

高等学校教材

电路理论基础

第四版

哈尔滨工业大学电工基础教研室 编

主 编 孙立山 陈希有

副主编 刘洪臣 霍 炬



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等 学 校 教 材

013063185

TM13
114-4

郑重声明

高等教育出版社(北京)本馆(天津)《电路理论基础》一书出版于2004年,由于教材内容、制作行为违法(侵权),被国家版权局责令停止销售,并多次警告。本馆在接到警告后,立即停止销售,并对侵权行为的法律责任进行了深刻反省。经过多年努力,侵权行为的法律责任已经得到妥善处理,侵权行为的法律责任已经得到妥善处理。侵权行为的法律责任已经得到妥善处理。侵权行为的法律责任已经得到妥善处理。侵权行为的法律责任已经得到妥善处理。

本馆联系电话

010-58604000

本馆地址

天津滨海新区

本馆邮编

300130

本馆网址

http://www.hep.com.cn

电路理论基础

Dianlu Lilun Jichu

第 四 版

哈尔滨工业大学电工基础教研室 编

主 编 孙立山 陈希有

副主编 刘洪臣 霍 炬



图书馆

TM13

114-4



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING



北航 C1671293

013083182

林 森 刘 学 等 高

内容提要

本书是2004年出版的《电路理论基础》(第三版)的修订版,内容符合教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的“电路理论基础”课程教学基本要求。本次修订在保持第三版特色的前提下,对教材内容体系进行了调整,突出教学重点和工程实用性。

全书共分13章,主要内容包括:电路元件与电路基本定律、线性直流电路、电路定理、正弦电流电路、三相电路、非正弦周期电流电路、频率特性和谐振现象、线性动态电路暂态过程的时域分析、线性动态电路暂态过程的复频域分析、二端口网络、网络图论与网络方程、非线性电阻电路、均匀传输线。另外有4个附录,附录A 磁路、附录B Cadence OrCAD/Capture, PSpice概要、附录C MATLAB概要、附录D 工程应用与扩展。

本书适合作为普通高等学校电气类、电子信息类和自动化类专业电路课程的教材使用,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论基础/孙立山,陈希有主编;哈尔滨工业大学
电工基础教研室编. —4版. —北京:高等教育出版社,
2013.7

ISBN 978-7-04-037361-5

I. ①电… II. ①孙…②陈…③哈… III. ①电路理
论-高等学校-教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第118915号

策划编辑 杜 炜 责任编辑 杜 炜 封面设计 于文燕 版式设计 童 丹
插图绘制 于 博 责任校对 殷 然 责任印制 张福涛

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京市白帆印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 29.75
字 数 670千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 1985年7月第1版
2013年7月第4版
印 次 2013年7月第1次印刷
定 价 43.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 37361-00

北京·清华大学出版社
010-62770175 010-62776969

第四版前言

《电路理论基础》(第三版)自2004年出版以来,教育部、财政部在全国范围内实施了“高等学校教学质量与教学改革工程”,2012年又开始了精品资源共享课建设工作,这些都为电路课程教材建设提出了新的要求。例如增加工程实践内容,介绍仿真工具的应用,将电的能量属性与信息属性并重等。此外,还要求教材内容易于取舍,以满足不同学校和专业的教学需求。因此,本次修订过程中,在充分保留第三版先稳态后暂态的基本结构基础上,为满足上述要求,并理顺教学内容使之易教易学,结合作者多年教学实践,对第三版内容主要做了如下修改。

1. 电容、电感和电阻是电路的基本元件,将第三版教材的第5章“电容元件”和“电感元件”移至第1章,与电阻元件一起讲授;将耦合电感和理想变压器移至正弦电流电路一章中。

2. 降低了对非线性电路内容的要求,将第三版教材中的非线性暂态电路删除,将非线性直流电路后移至第12章,并扩展为非线性电阻电路,增加了小信号分析法。

3. 将传输线中的内容顺序做了调整,先介绍正弦稳态,后介绍暂态。这样调整主要是因为稳态内容相对于暂态内容好理解,使学生更容易掌握,另外也和本书体系一致。

4. 对第三版教材中频率特性和串联谐振的顺序进行了调整,先介绍 RLC 串联电路的谐振现象,用来分析 RLC 电路的频率特性,又结合实际介绍几种滤波器。

5. 将第三版教材中10.5节“一阶电路的零状态响应”的内容分成三节内容来介绍,分别是“一阶电路的阶跃响应”、“一阶电路的冲激响应”和“正弦电源作用下的一阶电路”,通过对不同激励源作用下的暂态分析,加强了阶跃电源和冲激电源作用下的理解和分析,便于不同学校和专业对其内容进行取舍。

6. 本着理论和实际相结合,加强工程能力的目的,编写了附录D中的五个工程应用示例,作为学生扩展学习内容。

书中标有星(*)的整节内容属于参考内容,可以取舍,不要求讲授。

感谢哈尔滨工业大学周长源教授、许承斌教授等,他们严谨的治学态度和作风奠定了哈尔滨工业大学电工基础教研室的的教学传统,他们的教学经验为本书的编写提供了宝贵的借鉴。

本书在编写过程中还参阅了部分国内外优秀教材,也对这些教材的作者致以谢意。本书由天津大学孙雨耕教授、余晓丹副教授审阅,他们仔细地审阅了书稿并提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

第三版教材主编陈希有教授虽已调至大连理工大学工作,但为了教材建设的连续性和继承性,在本次修订中仍积极参与修订大纲的制定、审阅修订内容,并亲自修订第6、8、9、10章。所以本次修订是哈尔滨工业大学与大连理工大学合作的结果。

参加修订工作的人员还有:刘洪臣,修订第4、5、12章;霍炬,修订第1章和附录C;杨旭强,

修订第 2、3 章;金钊,修订第 7 章;齐超,修订第 11 章;刘东梅,修订附录 B。附录 D 由集体完成。全书由孙立山教授审定、修改、补充和定稿,并修订第 13 章。

本书是国家精品课程及精品资源共享课建设内容的一部分,其他工作仍在继续。由于编者水平有限,本书难免存在不足甚至错误之处,敬请同行教师及读者不吝赐教。编者联系方式如下:

孙立山:sunlishan@hit.edu.cn;陈希有:chenxy@dlut.edu.cn。(副主编)(《地基检测》)

本书是国家精品课程及精品资源共享课建设内容的一部分,其他工作仍在继续。由于编者水平有限,本书难免存在不足甚至错误之处,敬请同行教师及读者不吝赐教。编者联系方式如下: 2013 年 1 月

本书是国家精品课程及精品资源共享课建设内容的一部分,其他工作仍在继续。由于编者水平有限,本书难免存在不足甚至错误之处,敬请同行教师及读者不吝赐教。编者联系方式如下: 第一章 绪论 1.1 绪论 1.2 地基检测的发展 1.3 地基检测的任务 1.4 地基检测的学科交叉 1.5 地基检测的展望

本书是国家精品课程及精品资源共享课建设内容的一部分,其他工作仍在继续。由于编者水平有限,本书难免存在不足甚至错误之处,敬请同行教师及读者不吝赐教。编者联系方式如下: 第二章 地基检测的理论与方法 2.1 地基检测的理论与方法 2.2 地基检测的理论与方法 2.3 地基检测的理论与方法 2.4 地基检测的理论与方法

本书是国家精品课程及精品资源共享课建设内容的一部分,其他工作仍在继续。由于编者水平有限,本书难免存在不足甚至错误之处,敬请同行教师及读者不吝赐教。编者联系方式如下: 第三章 地基检测的仪器与设备 3.1 地基检测的仪器与设备 3.2 地基检测的仪器与设备 3.3 地基检测的仪器与设备 3.4 地基检测的仪器与设备

本书是国家精品课程及精品资源共享课建设内容的一部分,其他工作仍在继续。由于编者水平有限,本书难免存在不足甚至错误之处,敬请同行教师及读者不吝赐教。编者联系方式如下: 第四章 地基检测的试验方法 4.1 地基检测的试验方法 4.2 地基检测的试验方法 4.3 地基检测的试验方法 4.4 地基检测的试验方法

本书是国家精品课程及精品资源共享课建设内容的一部分,其他工作仍在继续。由于编者水平有限,本书难免存在不足甚至错误之处,敬请同行教师及读者不吝赐教。编者联系方式如下: 第五章 地基检测的工程应用 5.1 地基检测的工程应用 5.2 地基检测的工程应用 5.3 地基检测的工程应用 5.4 地基检测的工程应用

本书是国家精品课程及精品资源共享课建设内容的一部分,其他工作仍在继续。由于编者水平有限,本书难免存在不足甚至错误之处,敬请同行教师及读者不吝赐教。编者联系方式如下: 第六章 地基检测的新技术 6.1 地基检测的新技术 6.2 地基检测的新技术 6.3 地基检测的新技术 6.4 地基检测的新技术

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

绪论	1
第 1 章 电路元件与电路基本定律	5
1.1 电流、电压与电功率	5
1.2 电阻元件	9
1.3 电容元件	11
1.4 电感元件	13
1.5 独立电源	16
1.6 受控电源	19
1.7 基尔霍夫定律	20
小结	24
习题 1	26
第 2 章 线性直流电路	30
2.1 电阻网络的等效	30
2.2 含源支路的等效变换	36
2.3 支路电流法	38
2.4 回路电流法	41
2.5 节点电压法	45
2.6 运算放大器	50
2.7 含运算放大器电路的分析	52
小结	56
习题 2	57
第 3 章 电路定理	63
3.1 置换定理	63
3.2 齐性定理和叠加定理	65
3.3 等效电源定理	69
3.4 特勒根定理	73
3.5 互易定理	74

3.6 对偶原理	76
小结	78
习题 3	78
第 4 章 正弦电流电路	82
4.1 正弦电流	82
4.2 正弦量的相量表示法	85
4.3 基尔霍夫定律的相量形式	89
4.4 RLC 元件上电压与电流的相量关系	91
4.5 阻抗与导纳	94
4.6 正弦电流电路的相量分析法	100
4.7 正弦电流电路的功率	103
4.8 最大功率传输定理	109
4.9 耦合电感	112
4.10 含互感元件的正弦电流电路	117
4.11 理想变压器	123
小结	126
习题 4	127
第 5 章 三相电路	134
5.1 三相电源和三相电路	134
5.2 星形联结和三角形联结	136
5.3 对称三相电路的计算	142
5.4 不对称三相电路示例	144
5.5 三相电路的功率	145
*5.6 三相电路功率的测量	149
小结	151
习题 5	151

第 6 章 非正弦周期电流电路	154
6.1 非正弦周期电流和电压	154
6.2 非正弦周期函数的傅里叶级数	155
6.3 非正弦周期量的有效值、平均功率	161
6.4 非正弦周期电流电路的计算	163
*6.5 对称三相电路中的谐波	166
小结	169
习题 6	170
第 7 章 频率特性和谐振现象	172
7.1 网络函数和频率特性	172
7.2 串联谐振电路	175
7.3 RLC 串联电路的频率特性	179
7.4 并联谐振电路	183
*7.5 滤波器简介	186
小结	193
习题 7	193
第 8 章 线性动态电路暂态过程的时域分析	196
8.1 动态电路的暂态过程	196
8.2 电路量的初始值	198
8.3 一阶电路的零输入响应	200
8.4 阶跃函数和冲激函数	204
8.5 一阶电路的阶跃响应	207
8.6 一阶电路的冲激响应	210
8.7 正弦电源作用下的一阶电路	213
8.8 一阶电路的全响应	215
8.9 一阶电路暂态响应的一般形式	217
8.10 求解暂态响应的卷积积分法	224
8.11 二阶电路的暂态过程	226
8.12 状态变量分析	233

小结	237
习题 8	238

第 9 章 线性动态电路暂态过程的复频域分析	245
9.1 拉普拉斯变换	245
9.2 拉普拉斯变换的基本性质	248
9.3 拉普拉斯逆变换	250
9.4 复频域中的电路定律与电路模型	254
9.5 用拉普拉斯变换分析线性动态电路的暂态过程	258
9.6 网络函数	265
小结	271
习题 9	271
第 10 章 二端口网络	276
10.1 二端口网络	276
10.2 导纳参数方程和阻抗参数方程	278
10.3 传输参数方程和混合参数方程	283
10.4 二端口网络的等效电路	288
10.5 二端口网络与电源和负载的连接	291
10.6 二端口网络的级联	295
小结	298
习题 10	299
第 11 章 网络图论与网络方程	304
11.1 网络的图、树	304
11.2 基本回路和基本割集	307
11.3 基尔霍夫定律方程的关联矩阵形式	309
11.4 基尔霍夫定律方程的基本	

回路矩阵形式	311	A.2 铁磁物质的磁化特性	381
11.5 基尔霍夫定律方程的基本 割集矩阵形式	313	A.3 磁阻与磁导	384
11.6 广义支路及其方程的矩阵 形式	317	A.4 恒定磁通磁路的计算	387
11.7 电路方程的矩阵形式	319	A.5 正弦电压作用下铁心磁路的 磁通	391
小结	322	A.6 电流波形的畸变	393
习题 11	323	A.7 铁内损耗	395
第 12 章 非线性电阻电路	326	A.8 正弦磁通磁路的计算	398
12.1 非线性电阻元件的特性	326	A.9 铁心线圈及其电路模型	401
12.2 非线性直流电路方程	327	A.10 铁心变压器的电路模型	402
12.3 数值分析法	332	小结	404
12.4 分段线性近似法	335	习题 A	406
12.5 图解法	337	附录 B Cadence OrCAD/Capture, PSpice 概要	409
12.6 小信号分析法	338	B.1 编辑电路原理图	409
小结	341	B.2 设置分析类型	414
习题 12	341	B.3 查看仿真结果	415
第 13 章 均匀传输线	344	附录 C MATLAB 概要	417
13.1 均匀传输线及其方程	344	C.1 MATLAB 使用要点	417
13.2 均匀传输线方程的正弦稳 态解	346	C.2 MATLAB 语言要点	419
13.3 均匀传输线上的行波	351	C.3 MATLAB 应用举例	421
13.4 无损耗线、驻波	357	C.4 获得帮助	422
13.5 均匀传输线的集中参数等 效电路	361	附录 D 工程应用与扩展	424
13.6 无损均匀线方程的通解	363	D.1 电阻、电容和电感元件的种 类及特点	424
13.7 无损均匀线上波的发出	365	D.2 电力系统的谐波及其防治	431
13.8 无损均匀线上波的反射	366	D.3 示波器探头初步	435
小结	373	D.4 混沌电路及其应用	442
习题 13	374	D.5 信号的无畸变传输	445
附录 A 磁路	377	习题参考答案	448
A.1 磁路及其基本定律	377	参考文献	465

绪 论

从工程技术观点看,电(electricity)是一种优越的能量形式和重要的信息载体,因为它具有易于变换、易于传输和易于控制的特点。例如,将电暖气、电动机和日光灯通电后,电能即分别被变换为热能、机械能和光能,起到取暖、拖动和照明的作用;通过海底电缆或远距离输电线,可以将电能从发电厂传送至数百乃至上千公里外的遥远用户。通过电话网、有线电视网以及计算机网络,人们在办公室或家中即可获得丰富的外界信息。借助开关和控制单元可以方便地实现对电能或电信号在转换或传输过程中的控制。电的理论基础是电磁学(electromagnetism)和电子学(electronics)。

1820年奥斯特(H. C. Oersted)发现电流的磁效应和1831年法拉第(M. Faraday)揭示电磁感应原理是电磁学的奠基工作。到19世纪60年代,麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立了统一的电磁理论。电磁在发输配电和传送信息方面的应用几乎是同时并进的:电动机出现于19世纪30年代后期,发电站与输电线则于19世纪80年代初开始建造;电报发明于1837年,电话发明于1876年,而无线电通信则肇始于1895年。

19世纪末,洛伦兹(H. A. Lorentz)建立了古典电子理论。随之而来的是电子技术的迅速发展,特别是在信息技术上的广泛应用。这方面的历史里程碑,从器件上看是1906年出现电子三极管,1948年发明晶体管;从系统上看,第一家无线电广播电台于1920年在匹茨堡开播,第一家电视台于1935年由英国广播公司(BBC)建成,第一台电子计算机1946年诞生于美国宾州大学。

20世纪是电气化的世纪。特别是20世纪的后半叶,电技术在各个领域取得了惊人的进展,各种新型电子器件的出现和电子计算机的冲击,推动了一场技术革命。预计21世纪,在改善人们的生活方式、促进社会文明的进程中,电技术依然是一个重要的技术基础。

2 电 路

电的应用,无论是能量转换或信息处理,都要由电器件(electric device)来实现。其中除了电磁和电子的过程外,还涉及声、光、热等物理现象,但它们都与电相联系。实际应用的电器件种类繁多,功能各异。从其基本功能出发,把能够输出电能或电信号的器件,例如电池、发电机和各种信号源等统称为电源(source);把要求输入电能或电信号的器件,例如电灯、电动机和各种收信设备等统称为负载(load)。此外,还有用来传输、变换、控制和测量电能和电信号的电器件,分别

如电缆、变压器、开关和电表等。

电源和负载通过一些传输、变换、控制、测量等器件连接起来,构成**电路**(electric circuit),用以实现电能和电信号的技术应用。简言之,电路是由电器件互联而成的电流的通路。电技术的应用愈来愈广泛,电路也愈来愈复杂。例如横亘数省、包括若干发电厂、供许多城乡用电的电力网就是一个大电路。在一个几平方毫米的芯片上制成的**集成电路**(integrated circuit)也是一个非常复杂的电路。

其实器件和电路的概念是相对的。譬如电力网中的一个发电厂,可以看成是一个电源器件。但是为了分析该器件的特性,又需要全面分析发电厂内部的电路,而一个发电厂内部的电路又是相当复杂的。上面提到的集成电路,从其外部端子上的特性来看,它又是一个器件,需要与电源、负载连接起来才能应用。

电路又常称为**电网络**(electric network)或简称网络。现在又广泛使用**系统**(system)这一概念。系统是由相互联系、相互制约、相互作用的各个部分组成的具有一定整体功能和综合行为的统一体。可见电路也是一个系统。电力网又称为**电力系统**(power system)。不过系统的概念比电路要更加广泛,常涉及更多方面的物理过程,甚至社会现象。

3 电路理论

电技术的发展,使电路越来越复杂。为了深入研究和促进应用,便需要并已形成**电路理论**(circuit theory)这门独立学科。从历史上看,1847年建立的**基尔霍夫定律**(Kirchhoff's Laws)是电路理论的基石。

电路理论是研究电路普遍规律的一门学科。既然要研究普遍规律,就需要建立**电路模型**(circuit model),即把实际电路的本质特征抽象出来所形成的理想化了的电路。为此,要把每一个电器件的本质特征用一个或若干个理想化的**电路元件**(circuit element)来表征,其中每一种元件只表示一种电磁特性(譬如电压与电流的关系,电压与电荷的关系等)。例如用电阻元件表示电阻器能够将电能转变为热能的电磁特性;用电容元件表示电容器能够储存电荷的电磁特性,用与电容元件并联的电阻元件表示电容器的漏电特性。虽然实际的电器件种类繁多,但用以表征这些器件主要电磁特性的理想化电路元件的种类却为数很少。

元件的电磁特性可以用**参数**(parameter)、**特性方程**(characteristic equation)或**特性曲线**(characteristic curve)来表示。参数是表示元件电磁特性的某种量值。根据元件电磁特性的差异,元件可以分为线性元件与非线性元件、时变参数元件与非时变参数元件、集中参数元件与分布参数元件等。

当元件的电磁特性为线性关系时称为**线性元件**(linear element),否则称为**非线性元件**(non-linear element)。线性元件的参数与电磁量无关。由电源和线性元件组成的电路称为**线性电路**(linear circuit)。描述线性电路的方程是线性代数方程或线性微分(积分)方程。不能用线性方程来描述的电路称为**非线性电路**(nonlinear circuit)。例如大部分含半导体电子元件的电路就属

于非线性电路。线性电路已有比较成熟的理论。非线性电路理论近年来有很大进展,成为非常活跃的研究领域。

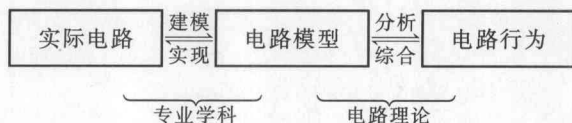
参数随时间而变化的元件称为**时变**(time-varying)参数元件,否则称为**非时变**(time-invariant)参数元件。含有时变参数元件的电路称为**时变电路**,否则称为**非时变电路**。时变电路是一个专门的研究领域,本书不欲涉及。

当元件各向尺寸远小于电磁量工作频率所对应的电磁波波长而无需考虑电磁量的空间分布时,这种元件称为**集中**(lumped)参数元件,仅含集中参数元件的电路称为**集中参数电路**(lumped circuit)。集中参数元件只涉及端子(terminal)上的电磁量,这些电磁量不是空间坐标的函数。例如,我国电力网的工作频率是 $f=50\text{ Hz}$,电压、电流的传播速度近似为光速,即 $c=3\times 10^8\text{ m/s}$,对应的波长为 $\lambda=c/f=6\ 000\text{ km}$,对以此为工作频率的电气设备来说,其尺寸很少接近这一长度,因此可按集中参数电路来处理,认为电能在这些设备中的传输是瞬间完成的。但也有些情况需考虑电磁量的空间分布性,这种电路称为**分布参数电路**(distributed circuit)。例如,对无线电接收机的天线来说,若所接收到的信号频率为 100 MHz ,则对应的波长为 $\lambda=3\text{ m}$,因此不能把天线视为集中参数电路元件。再如,远距离直流输电线路,其电压、电流随位置而变化,因此要用分布参数电路理论进行分析。

元件通过端子的互联,构成电路模型。本书以后提到的电路如无特别说明均指电路模型。

电路模型与实际电路的关系是前者在一定程度上反映后者的本质性状。要求反映得愈精确,建立的模型将愈复杂。从另一角度看,一个电路模型也只在一定条件下反映某一实际电路,不满足此条件时,需要更换不同的模型。

电路理论的研究对象不是实际电路,而是电路模型。具体地说:从给定的电路模型研究其行为就是**电路分析**(circuit analysis);从要求的电路行为探讨如何构成一个符合要求的电路模型则是**电路综合**(circuit synthesis)。至于怎样从一个具体电路出发建立它的模型,以及从电路模型设计并实现一个实际电路,乃是专业学科的任务,可以直观地用下图表述:



4 电路理论基础

本书名为《电路理论基础》,是大学本科的一本电路课程入门教材。电路课程是电气类、电子信息类、自动化类专业的一门重要的技术基础课程。通过本课程的学习,使学生掌握电路的基本理论、分析电路的基本方法和进行实验的初步技能,并为后续课程准备必要的电路知识。

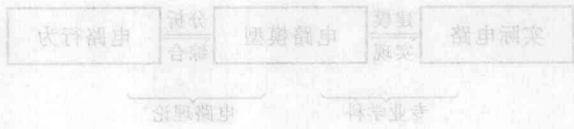
这里所谓“基础”,不仅指数理基础,而且还指电类工程学科中最基本的内容,即基本定理、

基本概念和基本分析方法。从电路理论的大方面来说,本书只涉及“分析”而没有涉及“综合”,因为分析是综合的基础。本书大部分篇幅介绍线性、非时变、集中参数电路的分析,对非线性电路和分布参数电路只介绍最基本的概念和常用的分析方法。

对于电类各专业,电路是极为重要的技术基础课。其中许多概念和方法要求透彻理解和牢固掌握。这些概念和方法将会使读者受益终生。

本书在编写过程中,参考了国内外许多优秀的教材和有关文献,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校电类专业的教材,也可供从事电路工作的工程技术人员参考。

本书在编写过程中,参考了国内外许多优秀的教材和有关文献,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校电类专业的教材,也可供从事电路工作的工程技术人员参考。



时域分析

本书在编写过程中,参考了国内外许多优秀的教材和有关文献,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校电类专业的教材,也可供从事电路工作的工程技术人员参考。

第1章 电路元件与电路基本定律

符号	名称	单位	符号	名称	单位
b	磁通	韦伯 (Wb)	γ	电导	西门子 (S)
ϕ	磁通量	韦伯 (Wb)	λ	电荷量	库仑 (C)

【导言】

学习电路课程的主要任务是学会分析电路,进而能确定电路的行为特征。为此先要定义描述电路行为的物理量,即电路变量。这些变量必须受到电路结构的约束和电路元件的约束。前者由基尔霍夫定律给出,它与元件的性质无关,是电路理论的基本定律;后者称为元件方程。基尔霍夫定律和元件方程是列写电路方程的依据。据此,本章内容包括三部分:首先介绍常用电路变量即电流、电压的定义及电功率与能量的计算,重点是建立参考方向的概念,它将贯穿电路课程的始终。然后介绍几个在本课程中首先遇到的电路元件,包括电阻、电容、电感、独立电源和受控电源,重点是这些元件的端口方程。最后介绍基尔霍夫两个定律,包括它们的基本陈述和推广。

通过本章学习,要求读者掌握建立电路方程的基本依据,从而为后续各章建立各种特定分析方法奠定重要基础。

1.1 电流、电压与电功率

电路分析的目的是要确定电路的行为。电路的行为用电路变量来表征。电路的主要变量有电流、电压、电荷和磁链。本节简要复习电流和电压的概念,着重介绍它们的参考方向。

1. 电流

荷电质点的有序运动形成**电流**(current)。电流是一种客观的物理现象,通过它的热效应和磁效应,人们可以觉察到它的存在。为了衡量电流的大小,在时间 dt 内,通过某截面的电荷量的代数和为 dq ,则电流定义为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

其方向规定为**正电荷运动的方向**。这样,电流一词就有两个不同的意义,一是指一种物理现象;另一是指量化描述该现象的物理量。

电荷的SI(国际单位制)单位为库[仑](Coulomb,符号为C),时间的SI单位为秒(second,符

号为 s)时,电流的 SI 单位为安[培](Ampere,符号为 A), $1\text{ A}=1\text{ C}/1\text{ s}$ 。表 1.1 列出了 SI 单位中规定的用来构成十进倍数和分数单位的词头。利用这些词头,可以构成更大或更小的单位。

表 1.1 SI 倍数与分数词头

倍率	词头名称词	词头符号	分率	词头名称词	词头符号
10^{24}	尧[它] yotta	Y	10^{-1}	分 deci	d
10^{21}	泽[它] zetta	Z	10^{-2}	厘 centi	c
10^{18}	艾[可萨] exa	E	10^{-3}	毫 milli	m
10^{15}	拍[它] peta	P	10^{-6}	微 micro	μ
10^{12}	太[拉] tera	T	10^{-9}	纳[诺] nano	n
10^9	吉[咖] giga	G	10^{-12}	皮[可] pico	p
10^6	兆 mega	M	10^{-15}	飞[母托] femto	f
10^3	千 kilo	k	10^{-18}	阿[托] atto	a
10^2	百 hecto	h	10^{-21}	仄[普托] zepto	z
10	十 deka	da	10^{-24}	幺[科托] yocto	y

一段电路中的电流有两个可能的方向。电流的方向既可用箭头“ \rightarrow ”表示,也可用双下标表示。例如在图 1.1 中电流可从 a 点流向 b 点或相反,分别用 i_{ab} 和 i_{ba} 表示。在分析复杂电路时,往往难以判断电流的真实方向,而且有些电路中电流的真实方向随时间不断改变。为此,在列写电路方程时,可任意假设一个电流的方向,称为电流的参考方向(reference direction),并用箭头标示在图中,如图 1.2 所示。选定参考方向后,电流便是代数量。电流的真实方向由电流代数值的符号和参考方向来判断。当按参考方向求得的电流为正值时,表明其真实方向与参考方向一致;否则相反。例如图 1.2 中若电流 $i>0$,表明电流是从 a 点流向 b 点;否则是从 b 点流向 a 点,即真实方向与参考方向相反。电流的真实方向反映的是客观事实,是确定的。因此,若选择不同的参考方向,同一电流的绝对值相同,但符号相反,即

$$i_{ab} = -i_{ba}$$

电路中一般无需标注电流的真实方向,若为了某些解释确需标注,则当用虚线箭头以与标示参考方向的箭头相区别。

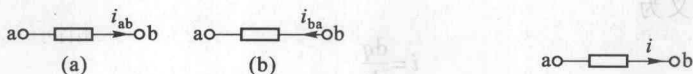


图 1.1 一段电路中电流的方向 图 1.2 电流的参考方向

量值和方向不随时间变化的电流称为直流(direct current,记作 DC 或 dc)或恒定电流。随时

间作周期性变化且平均值为零的电流称为**交变电流**(alternating current, 记作 AC 或 ac), 简称交流。直流和交流是两种重要的电流。通常用大写字母 I 表示直流, 用小写字母 i 或 $i(t)$ 表示量值或方向随时间变化的电流。

2. 电压

单位正电荷从电路中的一点移动到另一点, 电场力对电荷做功。设电场力将电量为 dq 的正电荷由 a 点移动到 b 点所做的功为 dW_{ab} , 则**电压**(voltage) 定义为

$$u_{ab} = \frac{dW_{ab}}{dq} \quad (1.2)$$

在式(1.2)中, u_{ab} 表示 a 、 b 两点间的电压, SI 单位为伏[特](Volt, 符号为 V)。

电压又称**电位差**(potential difference), 与电压相关的另一个物理量是**电位**(potential)。电位的物理意义是: 在电路中可任选一点为**参考点**(reference point)(零电位点, 常用符号 \perp 表示), 电路中某点与参考点之间的电压称为该点的**电位**, 用 φ 表示。有了电位的概念, 两点之间的电压便等于这两点的电位之差。

电压的方向规定为从**高电位指向低电位的方向**。故有时将电压称为**电位降**。为了在电路中表示电压的方向, 必须任取一电压参考方向。电压参考方向可用双下标表示, 例如图 1.3(a)中, 若取电压参考方向为从 a 点到 b 点, 则电压记为

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

若式中 $\varphi_a > \varphi_b$, $u_{ab} > 0$, 表示从 a 点到 b 点电位是降低的, 即电压的真实方向与参考方向相同; 反之, 若 $\varphi_a < \varphi_b$, $u_{ab} < 0$, 则表示电压真实方向与参考方向相反。

若电压参考方向取得不同, 例如在图 1.3(b)中, 将参考方向取从 b 点指向 a 点, 则有

$$u_{ba} = \varphi_b - \varphi_a = -(\varphi_a - \varphi_b) = -u_{ab}$$

上式表明, 对某一电压, 若参考方向取得不同, 其绝对值相等而符号相反。

电压参考方向还可用“+”, “-”极性或箭头“ \rightarrow ”来表示。图 1.3(c)中“+”, “-”极性和箭头“ \rightarrow ”都表示电压 u_A 的参考方向是从 a 点指向 b 点。

当电压的量值和极性不随时间变化时, 称为**直流电压**(DC voltage)。通常用字母 U 表示直流电压, 用 u 或 $u(t)$ 表示量值或极性随时间变化的电压。作周期性变化且平均值为零的电压称为**交变电压**(alternating voltage)。

在分析电路问题时, 常常将一个元件上的电压和电流的参考方向取成相同的, 并称为**关联参考方向**。

参考方向是电路计算的一个重要概念。当开始分析一个电路时, 首先要设定参考方向, 因为电路方程将依赖于参考方向。不设定参考方向, 便难以作解析表达。参考方向一经设定, 就不宜随意更改, 否则易导致混乱。

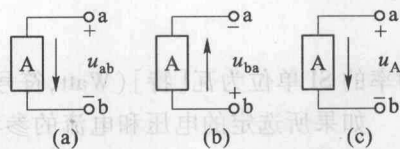


图 1.3 电压参考方向的表示法

3. 电动势

电路中一般都接有电源以维持电流的流动。从能量的角度看,电源具有将电荷从低电位处经电源内部转移至高电位处的能力,从而对电荷做功。设在 dt 的时间内,一电源使正电荷 dq 从负极经电源内部移至正极所做的功为 dW ,电源的电动势定义为

$$e = \frac{dW}{dq} \quad (1.3)$$

即电源电动势的数值等于将单位正电荷从负极经电源内部移到正极电源所做的功。电动势的单位与电压相同。相对于任意规定的参考方向,电动势也是代数量,它的真实方向是将正电荷从低电位端移向高电位端的方向,因此它与电压的正方向刚好相反。

4. 电功率

电功率是用以衡量电能转换或传输速率的物理量。若在 dt 时间内,消耗或吸收的能量为 dW ,则电功率定义为

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1.4)$$

当电能通过元件转换成其他形式的能量时,电能对外做功。此时称该元件为消耗电能或吸收功率;当其他形式的能量通过元件转换成电能时,此时称该元件为发出电能或发出功率。

设某部分电路元件 A 流过电流 i ,电压为 u ,且 u 、 i 为关联参考方向,如图 1.4(a)所示。根据电流的定义,在 dt 时间内通过的电荷量为 $dq = idt$ 。该电荷通过电路 A 时,电能所做的功即电路 A 吸收的电能等于该电荷量与端电压的乘积,即

$$dW = udq = uidt$$

因此,电路 A“吸收”的功率为

$$p = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1.5)$$

功率的 SI 单位为瓦[特](Watt,符号 W), $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ A}$ 。

如果所选定的电压和电流的参考方向相反,如图 1.4(b)所示,则式(1.5)就代表从该电路“发出”的功率。一段电路实际是吸收功率还是发出功率,要同时依据计算时所选择的电压、电流参考方向和计算结果的符号来判定。在关联参考方向下,如果按式(1.5)的计算结果为正值,则表明该电路实际上是吸收功率;若结果为负值,则是发出功率。对非关联参考方向,可对照分析。但是,一段电路究竟是吸收功率还是发出功率,不会因为计算时所选择的参考方向不同而得出不同的结论。

例如,在图 1.4(a)所示电路中,设 $u = -10 \text{ V}$, $i = 2 \text{ A}$,则 $p = -10 \text{ V} \times 2 \text{ A} = -20 \text{ W} < 0$,表明该段电路实际为发出功率,量值为 20 W ;对同一段电路,如选择图 1.4(b)所示的参考方向,则 $u =$

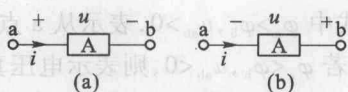


图 1.4 分析电功率时电流、电压的参考方向